

⑨

Best Available Copy

日本応用磁気学会誌 21, 493-496 (1997)

強磁性トンネル接合における絶縁障壁と磁気抵抗

Relationship between the Barrier and Magnetoresistance Effect
in Ferromagnetic Tunneling Junctions

手束 展規・安藤 康夫・宮崎 照宣・H. G. Tompkins*・S. Tehrani*・H. Goronkin*

東北大学工学部応用物理学科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980-77)

*モトローラ・インク, フェニックス・コーポレイション,

米国アリゾナ州テンピ市東エリオット通り 2100 (〒85284)

N. Tezuka, Y. Ando, T. Miyazaki, H. G. Tompkins,* S. Tehrani,* and H. Goronkin*

Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-77

*Phoenix Corporate Research Lab., MOTOROLA, Inc., 2100 East Elliot Road, Tempe, Arizona 85284, U.S.A.

The dependence of the tunneling magnetoresistive effect on the barrier height was investigated. The magnitude of the barrier height increased with increasing aluminum oxidation temperature and time from 0.3 to 2.3 eV in Fe/Al oxide/Fe junctions. However, those values are smaller than those reported for an Al_2O_3 barrier. A possible reason for this is that the barrier is not pure Al_2O_3 , but AlO_x , or another oxide created by interface mixing between Fe and Al oxide. On the other hand, the magnetoresistance ratio in these junctions varied up to 18% at room temperature and up to 30% at 4.2 K. The dependence of the magnetoresistance ratio at 4.2 K on the barrier height is roughly the same as predicted by Slonczewski's theory. This result shows that the effective spin polarization of ferromagnetic electrodes changes according to the barrier height.

Key words: tunneling magnetoresistive effect, ferromagnetic tunneling junction, magnetoresistance, barrier height, Al oxide

1. はじめに

強磁性トンネル接合(強磁性体/絶縁体/強磁性体)では, その磁気トンネリング効果による磁気抵抗比は, 理論的には両強磁性体の分極率により決まる^{1,2)}. 我々はこれまでに, 強磁性体として Fe, 50FeCo, Co, Ni, Fe-Ni 合金を, 絶縁体として Al の酸化物を用いた接合について, 分極率と磁気抵抗比の関係を報告してきた^{3,4)}. その結果, 実験的にも分極率の大きなものを電極に用いた強磁性トンネル接合の方が, 得られる磁気抵抗比も大きくなることが明らかとなった. しかし, 電極に同じ強磁性体を用いた試料でも, 4.2 K での磁気抵抗比の値はばらついた. また, 抵抗値も大きくばらつき, トンネル電流の温度依存性の理論式⁵⁾より求めた障壁高さは, 0.09~0.75 eV⁶⁾と従来報告されている Al_2O_3 の値 (約 3 eV)⁷⁾ に比べると遥かに小さな値であった. 最近報告されている磁気抵抗比の値は分極率から期待される値に近いものから⁸⁾, それよりも小さいもの⁹⁾ までである. さらに, 抵抗値も接合により, また同じ接合でも, ばらついている.

1989 年に Slonczewski はそれまでの理論をさらに発展させ, 磁気トンネリング効果に絶縁体の影響を取り入れた¹⁰⁾. 彼は, 強磁性体と絶縁体の界面での波動関数の連続性から, ①コ

ンダクタンスが両磁性層の磁化の相対角度の余弦に比例すること, ②磁気抵抗比が強磁性体の分極率の積に比例し, かつその分極率が障壁高さにより見かけ上変化する, ③絶縁体を介して, 強磁性体間に相互作用が働くこと, を示している. ①については, 実験的にも確認されている^{11,12)}, しかしながら, ②, ③に関する実験報告はほとんどない. したがって, 障壁高さが従来の報告値と異なる原因を含め, ②の指摘のような障壁高さと磁気抵抗比の関係を明らかにすることは, 磁気トンネリング効果そのものの研究はもちろんのこと, デバイス開発の観点からも非常に重要である.

本論文では, まず, 絶縁体に Al の酸化物を用い, その酸化条件による構造の変化ならびに障壁の高さについて調べた結果を述べる. さらに, Al の酸化条件を変えて作製した種々の障壁高さを有する接合の磁気抵抗比を調べ, Slonczewski の理論との比較を行う.

2. 実験方法ならびに測定方法

強磁性トンネル接合として, 十字型の Fe/Al oxide/Fe 接合をガラス基板上に作製した. 1, 3 層目の Fe は, EB 蒸着法で幅 1 mm の金属マスクを用いて作製した. その際の条件は, 3×10^{-6} Torr 以下の真空中で, 蒸着速度 1~2 Å/s, 設定膜厚 500, 1000 Å であり, 保磁力歪をつけるため, 1 層目, 3 層目の基板温度はそれぞれ, 200°C, 室温とした. 2 層目は, まず RF スパッタ法で Al 単層膜を直径 5 mm の円形に作製し, それを恒温槽で酸化することにより絶縁層とした. スパッタ条件は, 投入電力 4.4 W/cm², アルゴン圧 1.5 mTorr, スパッタ速度 7 Å/s, 設定膜厚は 30, 50 Å である. Al の酸化条件は, 温度: 30, 45, 60°C, 時間: 3~24 時間であり, 湿度は約 20% 以下に保った.

また, 接合形成による絶縁障壁への影響を検討するため, Al-(Al oxide)/Al, および Al-(Al oxide)/Fe 接合を作製した. Al, Fe の作製条件は強磁性トンネル接合の時と同じであるが, 1 層目の Al が電極も兼ねており, 形状が 1 mm × 15 mm × 500 Å のストライプ状となっている.

電流 (I)-電圧 (V) 曲線ならびに磁気抵抗曲線は直流四端子法で測定した. 構造解析は, FT-IR で行った. 構造解析用の試料形状は直径 12 mm の円盤状で, glass/Fe/Al の二層膜である.

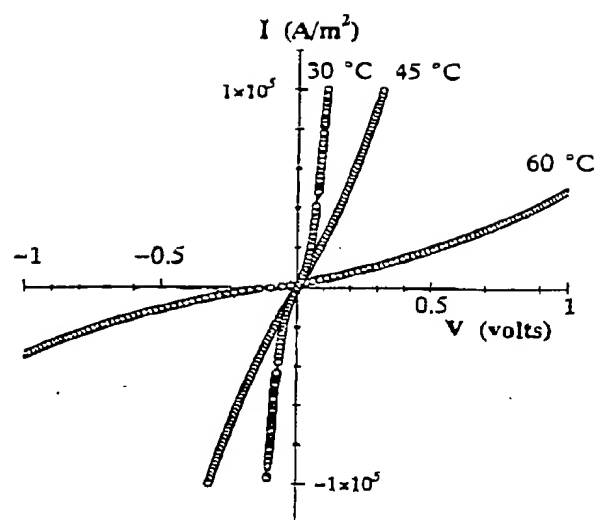


Fig. 1 Typical examples of I - V curves for Fe/Al oxide/Fe junctions.

3. 実験結果および考察

3.1 絶縁障壁 (ϕ , d) および構造

Fig. 1 に Fe/Al oxide/Fe 接合の 4.2 K での I - V 特性の 3 例を示す。このとき、電流密度は接合面積を 1 mm^2 として見做もっている。Al の酸化温度が高くなるに従い、曲線の傾きが緩やかに、また、変曲点が高電圧側に移動する。このようにして得られた I - V 曲線に、Simmons のトンネル電流の理論式¹³⁾ を用いてフィティングし、絶縁体の障壁高さ、 ϕ 、ならびに幅、 d 、を求めた。その結果を Table 1 にまとめて示す。ここで酸化条件が 30°C 、12 時間の場合、トンネル抵抗は得られなかった。また、得られた障壁高さの酸化温度依存性を Fig. 2(a) に示す。酸化温度が高くなるほど障壁高さは高くなり、0.3 から 2.3 eV まで変化する。また、酸化時間 12 時間と 24 時間の結果を比べると、24 時間酸化の方が障壁高さが高くなる。しかし、これらの値は、過去に報告されている Al_2O_3 の値 (約 3 eV) より小さい。

この原因を調べるために、Al-(Al oxide)/Al、および Al-(Al oxide)/Fe 接合についての同様の実験を行った。その結果を Fig. 2(b), (c) に示す。(b) の場合、障壁高さの酸化条件依存性は (a) と同様であり、その値は 2.5 eV となった。(c) の場合には、約 3 eV の値が得られ、従来の報告値と一致する。(a), (b), (c) を比較すると同じ酸化条件で作製した場合でも、また (c) ではより酸化時間が短い場合でも $\phi_{\text{Al}} < \phi_{\text{Fe}} < \phi_{\text{Al}}$ の関係にある。このことから、Al と Fe の界面の存在が障壁高さを低くする原因と考えられる。一方、障壁幅は、酸化時間が長くなるほど、温度が高くなるほど狭くなる傾向にある。

次に、Al の酸化状態を調べるために、FT-IR を用いて、構造解析を行った。Fig. 3 には、酸化条件を変化させたときのスペクトルの変化を示す。 Al_2O_3 は、約 960 cm^{-1} に Al-O の Stretching モードによるブロードなピークを示すことが報告されている¹⁴⁾。本実験結果では、温度が高くなるほどピーク強

Table 1 Barrier height and width of Fe/Al oxide/Fe junctions

| T ($^\circ\text{C}$) | t (h) | ϕ (eV) | d (Å) | MR (%) | |
|------------------------|-------|-------------|---------|--------|-------|
| | | | | 4.2 K | 300 K |
| 30 | 12 | - | - | - | - |
| 30 | 24 | 0.3 | 32 | 28 | 6.5 |
| 30 | 24 | 0.25 | 47 | 21 | 8.6 |
| 30 | 24 | 0.56 | 29 | 6.9 | 3.7 |
| 45 | 12 | 0.81 | 25 | 1.0 | 0.58 |
| 45 | 12 | 0.96 | 22 | 1.0 | 0.41 |
| 45 | 24 | 1.9 | 17 | 0 | 0 |
| 60 | 12 | 1.9 | 18 | 16 | 9.2 |
| 60 | 12 | 2.0 | 17 | 18 | 11 |
| 60 | 24 | 2.3 | 19 | 0 | 0 |

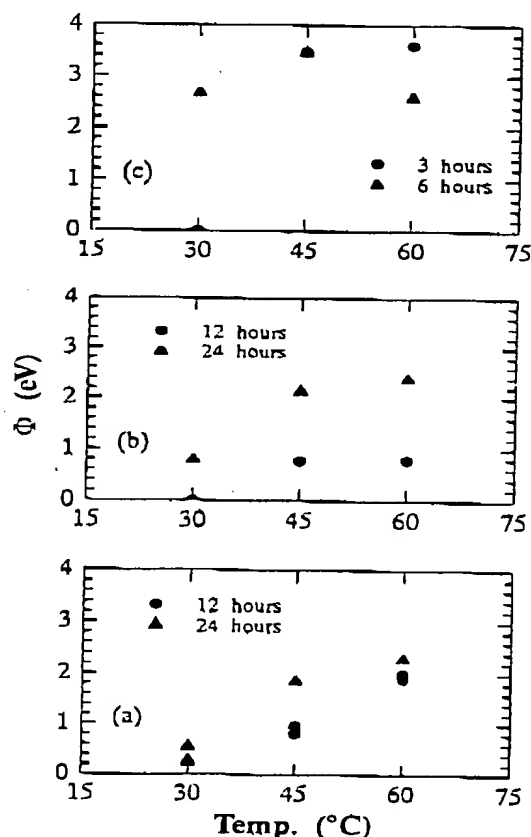


Fig. 2 Barrier height as a function of the oxidation temperature for (a) Al-(Al oxide)/Al, (b) Al-(Al oxide)/Fe, and (c) Fe/Al oxide/Fe junctions.

度が増し、また同温度においては、酸化時間が長いほどピーク強度が増す。また、 30°C の結果においては、酸化時間とともにピーク位置が若干変化しており、純粋な Al_2O_3 ではない可能性がある。これらのピークの変化は、 I - V 特性より求めた障壁高さの変化と類似しており、障壁高さが低い原因が、絶縁体の酸欠損の状態、ないしは Al-O の結合力が弱い状態を反映して

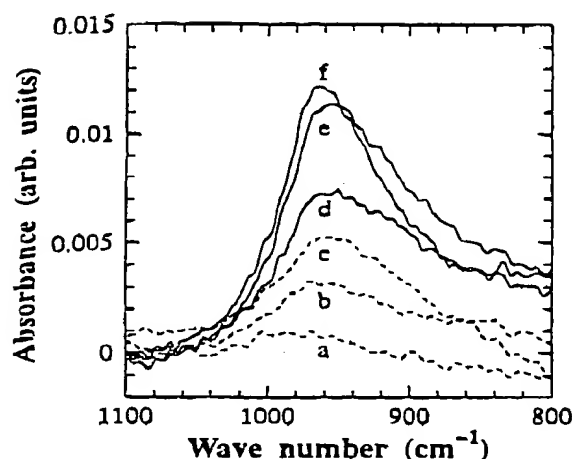


Fig. 3 FT-IR spectra for 500Å Fe/30Å Al films. a: 30°C×6 h, b: 30°C×12 h, c: 30°C×24 h, d: 60°C×1 h, e: 60°C×3 h, f: 60°C×6 h.

いると考えられる。しかし、詳しいことは分からず、今後さらに実験を進め、詳細に検討していく必要がある。

3.2 磁気抵抗比の障壁高さ依存性

Alの酸化条件を変化させることにより、種々の抵抗値を示す強磁性トンネル接合を作製することができる。Fig. 4に室温での磁気抵抗比の抵抗値依存性を示す。絶縁障壁にピンホールなどの欠陥が存在するため、もしくは面内抵抗の影響などで抵抗値が見かけ上負になる試料は省いて示している。 R_s は両磁性層の磁化の向きが平行の時の抵抗値、 ΔR は両磁性層の磁化の向きが反平行から平行への変化に伴う抵抗の変化分である。まず、酸化温度が高くなるに従い、 R_s が大きくなることがわかる。そして60°C、24時間の酸化条件の試料では、トンネル抵抗が支配的であるにもかかわらず、磁気抵抗効果は観測されなかった。FT-IRの測定において、60°C×24時間以上酸化した試料ではFeの酸化物のピークがある。したがって、酸化させるために高温、長時間放置したため、Feの酸化物ができ、また、その結果、界面に乱れなどが生じてスピンの保存されず、磁気抵抗比が観測できなかったと考えられる。また、 $R_s=10^{-3}\Omega$ と $R_s=10^2\Omega$ で比較的大きな磁気抵抗比が得られている。Slonczewskiの理論と比較するために、4.2 Kで磁気抵抗比を測定し、その障壁高さ依存性を示したのがFig. 5である。この際、導通や面内抵抗のために磁気抵抗曲線に異方性磁気抵抗効果が現れた試料や、抵抗、磁気抵抗比の温度変化からトンネル抵抗が支配的でないと思われる試料については省いて示してある^{15,16}。図には、過去にFeを電極にした試料で、磁気抵抗比と障壁高さの結果が報告されているものについても共に示す。障壁高さが約0.5~1 eVで磁気抵抗比がほとんど0となり、障壁高さが約0.3および2.0 eVで比較的大きな磁気抵抗比が得られている。

Slonczewskiは自由電子モデルを用いて、強磁性体と絶縁体の接合のために有効的な分極率¹⁷を、

$$P_0 = \frac{(k_+ - k_-)(\kappa^2 - k_+ k_-)}{(k_+ + k_-)(\kappa^2 + k_+ k_-)} \quad (1)$$

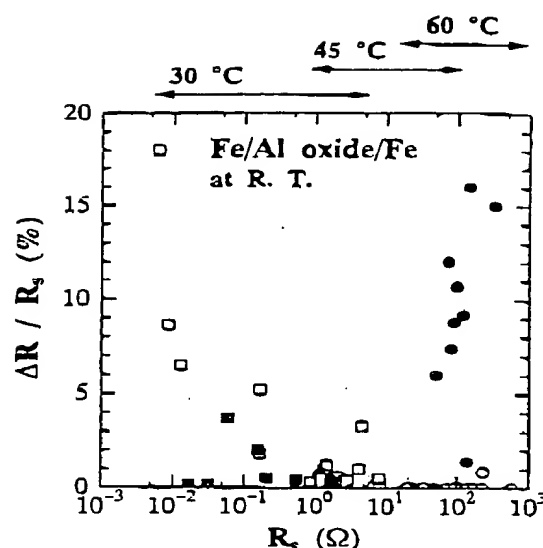


Fig. 4 MR ratio as a function of the resistance at room temperature. The oxidation conditions were as follows: ■: 30°C×12 h, □: 30°C×24 h, ▲: 45°C×12 h, △: 45°C×24 h, ●: 60°C×12 h, ○: 60°C×24 h.

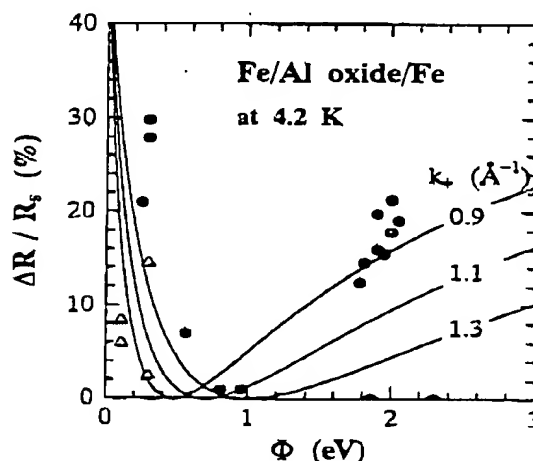


Fig. 5 MR ratio at 4.2 K as a function of the barrier height. Closed circles (●) indicate present experimental results, and open triangles (△) results reported by others.^{11, 21, 15)} The solid lines indicate the calculated results (after Slonczewski).

と表せることを示している^{21,18)}。ここで、 k_+ 、 k_- はそれぞれ強磁性体の majority と minority 電子の波数、 κ は絶縁体での減衰項であり、 κ を用いて障壁高さ(Φ)は、 $\Phi = \hbar^2 \kappa^2 / 2m^*$ と表せる。ここで m^* は電子の有効質量である。(1)式は、トンネル分光法で測定した分極率¹⁹⁾に、 $-1 \sim +1$ までの定数倍した値が有効的な分極率となり、その係数は障壁高さにより決まることを意味する。また、 k_+ 、 k_- の比は分極率より求まるが、絶対値はバンド計算や de Haas van Alphen 効果などより求めた値が必要なるため、ここでは k_- の値を変化させた。この結果をもとに磁気抵抗比を計算した結果がFig. 5中の実線である。本実験による磁気抵抗比の障壁高さ依存性は、Slonczewskiの計算

より導いた結果と傾向がほぼ一致している。したがって、絶縁障壁のために強磁性体の分極率が変化したことが、磁気抵抗比の障壁高さ依存性の原因と考えられる。数値には、計算結果を導く際、一次元の矩形ポテンシャルモデルで考えていることや、電子の有効質量などを考慮する必要がある。また、実験ではトンネル抵抗が支配的な試料のみを取り扱ったが、十字型の試料を用いる限り、面内抵抗(電極の抵抗)の効果も残るので、その影響も考慮しなければならない。しかしこれらのことよりも、絶縁体と強磁性体の界面の状態を含め、 AlO_x の構造を詳細に検討することが重要である。

4. ま と め

1) (a) Fe/Al oxide/Fe, (b) Al-(Al oxide)/Fe, および (c) Al-(Al oxide)/Al 接合を作製し、その I - V 特性から障壁高さを求めた。Al を同一条件で酸化しても障壁高さは、 $\phi_{(a)} < \phi_{(b)} < \phi_{(c)}$ の関係にあった。

2) FT-IR を用いて、Al の酸化状態を調べた結果、酸化温度が高いほど、酸化時間が長いほどピーク強度が増加した。また、酸化温度が 30°C のとき、酸化時間の増加とともにピーク位置がシフトした。

3) 4.2 K において、磁気抵抗比と接合の絶縁障壁の高さの関係を調べた。両者の関係は Slonczewski の指摘している有効分極率の考えで説明できることが明らかとなった。

謝 辞 本研究は、笹川科学研究助成、SRC Scholarship 助成、旭硝子財団研究助成、新エネルギー産業技術総合開発機構ならびに文部省科学研究費補助金基盤研究(A)(課題番号 08405001) により行われている。

文 献

- 1) M. Julliere: *Phys. Lett.*, **54A**, 225 (1975).
- 2) S. Maekawa and U. Gafvert: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-18**, 707 (1982).
- 3) 手塚辰規, 安藤康夫, 宮崎照彦: 日本応用磁気学会誌, **19**, 369 (1995).
- 4) N. Tezuka and T. Miyazaki: *J. Appl. Phys.*, **79**, 6262 (1996).
- 5) R. Stratton: *J. Phys. Chem. Solids*, **23**, 1177 (1962).
- 6) T. Miyazaki and N. Tezuka: *J. Magn. Magn. Mat.*, **151**, 403 (1995).
- 7) J. C. Fisher and I. Giaever: *J. Appl. Phys.*, **32**, 172 (1961).
- 8) J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey: *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 3273 (1995).
- 9) R. S. Bech, J. Anderson, J. Daughton, B. A. Everitt, and D. Wang: *IEEE Trans. Magn.*, in press.
- 10) J. C. Slonczewski: *Phys. Rev. B*, **39**, 6995 (1989).
- 11) 矢追俊彦, 石尾俊二, 宮崎照彦: 日本応用磁気学会誌, **16**, 303 (1992).
- 12) T. Miyazaki and N. Tezuka: *J. Magn. Magn. Mat.*, **138**, 231 (1995).
- 13) J. G. Simmons: *J. Appl. Phys.*, **34**, 1793 (1963).
- 14) R. W. Hannah: *Appl. Spectrosc.*, **17**, 23 (1963).
- 15) T. S. Plaskett, P. P. Freitas, N. P. Barradas, M. F. da Silva, and J. C. Soares: *J. Appl. Phys.*, **76**, 6104 (1994).
- 16) J. S. Moodera, L. R. Kinder, J. Nowak, P. LeClair, and R. Meservey: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 708 (1996).
- 17) J. Nowak and J. Rauluszkiwicz: *J. Magn. Magn. Mat.*, **109**, 79 (1992).
- 18) J. C. Slonczewski: Proceedings of the 5th Annual Symposium on Magnetism and Magnetic Materials, p. 285 (1994).
- 19) P. M. Tedrow and R. Meservey: *Phys. Rev. B*, **7**, 318 (1973).

1996年10月15日受理, 1997年1月16日採録

解説

ハード・ディスク装置

11

磁気ディスク
磁気記録
薄膜技術

次々世代 HDD 用ヘッドの 本命に「TMR」が急浮上

現行 MR ヘッド比 10 倍以上の再生出力を可能に

次々世代ハード・ディスク装置 (HDD) 用ヘッドの有力候補として、磁気抵抗効果を示すトンネル接合膜 (TMR 膜) を使う素子が急浮上してきた。次世代を担う GMR ヘッドの次をねらう。TMR 膜は、外部磁界を加えると抵抗値が最大で約 50 % 変化する磁気抵抗膜である。この TMR 膜を HDD の再生ヘッドに使えば、再生出力を現在主流となっている MR ヘッドの 10 倍以上、GMR ヘッドと比べても数倍にすることができる。現在は素子の開発段階だが、早ければ 1998 年には、ヘッドとしての評価が始まるもよう。

次々世代ハード・ディスク装置 (HDD) 用ヘッドの有力候補として、磁気抵抗効果を示すトンネル接合膜 (TMR 膜) を使う素子が急浮上してきた。

ハード・ディスク装置 (HDD) の面記録密度は、年率約 60 % の速さで上昇を続けている¹⁾。1996 年に 1.4G ビット/(インチ)²を超えた。1997 年中には 2G ビット/(インチ)²を達成するだろう²⁾。

この原動力となっているのが再生ヘッドの進歩である。現在主流となっているのは MR (magnetoresistive) ヘッド¹⁾。従来の薄膜ヘッド¹⁾より再生出力が数倍大きい。理想的には、再生出力を n 倍にすれば同一媒体を使ってトラック密度を n 倍にできる。面記録密度も n 倍にできる^{1,2)}。

MR ヘッドの次を担う再生ヘッドも 1997 年中には登場しそうだ。巨大磁気抵抗 (GMR: giant magnetoresistive) 膜を使った GMR ヘッド¹⁾である³⁾。

再生出力からみて、現行 MR ヘッドの限界は 3G ビット/(インチ)²あ

たり、との見方が強まっている。GMR ヘッドでその壁を超えようというのが HDD メーカーの思惑である。3G ビット/(インチ)²は、3.5 インチ型ハード・ディスク 1 枚あたりの容量でいえば約 5G バイト。3.5 インチ型 HDD はディスクを 1 枚～10 枚程度内蔵できるので、HDD の容量に換算すれば 5G バイト～50G バイトとなる。

GMR の次をねらう

薄膜ヘッドから MR ヘッド、GMR ヘッドへ。そして、さらなる再生ヘッドの進化を担う有力候補が急浮上してきた。いわゆる TMR (tunneling magnetoresistive) ヘッドである。

MR ヘッドや GMR ヘッドは、外部磁界を加えると抵抗が変化する磁気抵抗 (MR) 効果¹⁾を示す膜を再生素子として使う。媒体から発生す

る磁界を抵抗変化としてとらえ、電圧変化として出力する。このとき再生出力の大きさは、ほぼ膜の抵抗変化率に比例している。

TMRヘッドは、このMR膜や

GMR膜をTMR膜、つまり磁気抵抗効果を示すトンネル接合膜 (TMR膜) に置き換えたものである (図1)。TMR膜の抵抗変化率は、理論上は50%に達する。GMR膜としてはも

っとも一般的なスピンバルブ膜は7%程度、MRは2%程度である。GMR膜の数倍、MR膜に比べれば数十倍も大きい。それだけ大きな再生出力が得られることになる。

古くて新しいTMR

トンネル接合膜が10%以上の大きな磁気抵抗効果を示すことが見いだされたのは1975年のことである。GMR膜の発見は1988年だから、それよりかなり以前からTMR膜の存在は知られていたことになる。

しかし近年に至るまで、HDD用ヘッドの研究者の間でTMR効果が大きな話題になることはなかった。いくつかの研究グループがTMR膜を試作したが、数%と小さな抵抗変化率しか得られなかったためである。10%以上の抵抗変化率は、数Kといった超低温下でしか観測できなかった¹⁾。

状況が大きく変わったのは1994年のことである。東北大学の宮崎照宣教授らの研究グループが、300Kで18%の抵抗変化を示すTMR膜の作製に成功した (図2、図3)²⁾。これに続いて1996年には米IBM Corp. が室温で22%、1997年には富士通が室温で24%の抵抗変化率を達成した³⁾。HDD用ヘッドへの応用が一歩に現実味を帯びてきた。

¹⁾ MRヘッド=再生専用のヘッド。データの記録には誘導型のヘッドを利用する。GMRヘッドが巨大磁気抵抗効果を示す多層膜を利用するのにに対し、異方性磁気抵抗効果を示す単層膜 (Ni-Fe膜) を使う。

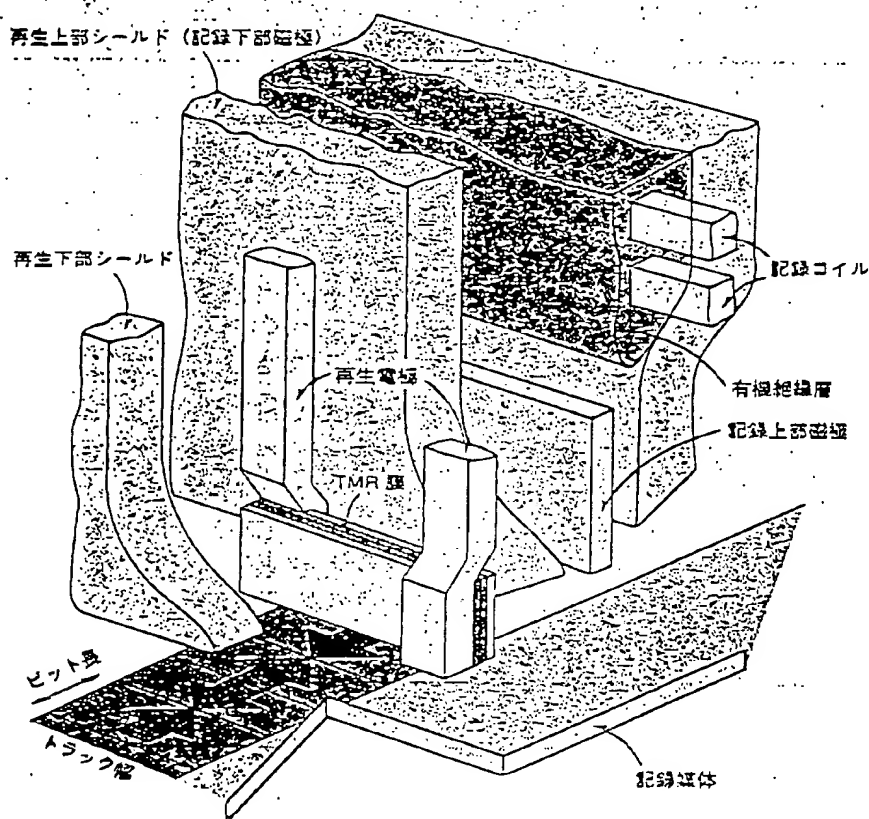


図1 TMRヘッドの基本構造 MRヘッドをベースとした場合を想定した。MRヘッドのMR膜をTMR膜に置き換え、再生電極部分を一部変更する。TMR膜は再生時に使う。記録時は、TMRヘッドに重ねて形成した、コイルとコアから成る記録ヘッドを使う。

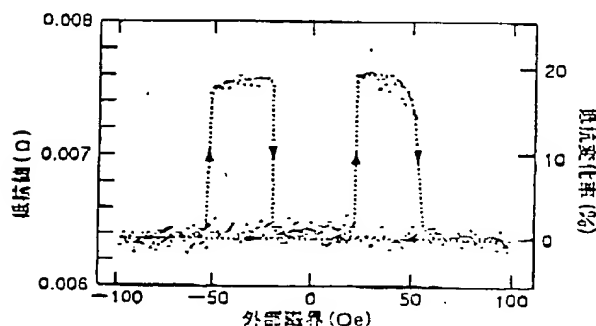
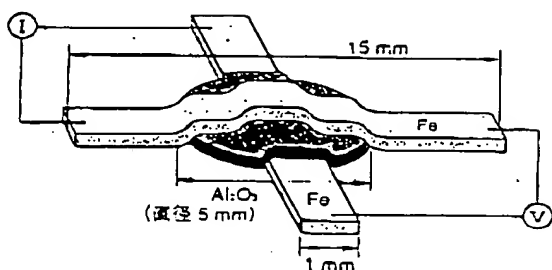


図2 東北大学が作製したTMR膜の抵抗変化特性 東北大学が1994年に測定したもの。Fe/Al₂O₃/Fe構造のTMR膜を使った。抵抗変化率は18%である。

(a) TMR膜の層構造



(b) TMR膜の外観

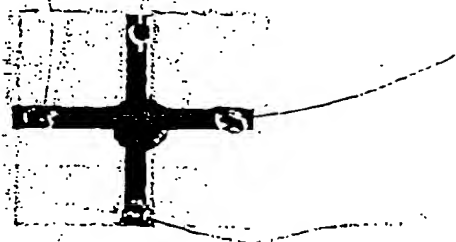


図3 東北大学が作製したTMR膜 (a)は層構造、(b)は作製した素子の外観。このTMR膜で1994年に抵抗変化率18%を達成した。

GMR膜に酷似

TMR膜は、もっとも単純な場合3層からなる多層膜である。2層の磁性層の間に薄い絶縁層を設ける。二つの磁性層に電圧を印加すると電子が絶縁層をトンネルして電流が流れる。ただし、トンネル電流の流れやすさ、つまり磁性層間の抵抗値は磁性層の磁化方向によって変わる。2層で磁化方向が180度逆(反平行)のとき膜の抵抗値は最大になり、同一のとき(平行)最小になる。

TMR膜をHDD用ヘッドの再生素子として使うときは、2層のうち1層の磁化方向だけが外部磁界の変化によって変化するようにする。たとえば、一方の磁性層上に反強磁性層¹を設ける。こうすることで反強磁性層と接した磁性層(ピン層)の磁化方向を固定し、もう片方の磁性層

(フリー層)は決まった磁化方向をとらない状態にする。ここに外部磁界を加えると、その方向によってフリー層の磁化方向が定まり、膜の抵抗値が変わる(図4)。膜の垂直方向に電流を流しておけば、外部磁界の変化を電圧変化として出力することができる。

反強磁性層を付加したTMR膜の構造は、反強磁性層/磁性層(ピン層)/非磁性層/磁性層(フリー層)の4層構造からなるGMR膜に酷似している。2層で磁化方向が180度逆(反平行)のとき膜の抵抗値は最大になり、同一のとき(平行)最小になるという挙動もGMR膜と同じである。

似ているが故の利点がある。GMRヘッドの技術をかなり利用できることである。TMR膜をHDD用

ヘッドに応用する場合は、GMRヘッドのGMR膜の部分をTMR膜に置き換え、電流端子の接続方法を若干変更するだけでよい。

安定した特性が得られない

ただしGMR膜とTMR膜では、構造上にわずかな違いがある。TMR膜がCuなどの非磁性層で2層の磁性層を隔てているのに対してTMR膜は絶縁層を使う点である。さらに、電流を流す方向が違う。GMR膜は、面内方向に電流を流したときに抵抗値変化が観測できる。これに対してTMR膜は、膜の垂直方向に電流を流す。このため、絶縁層の厚さや均一性がTMR膜の特性を大きく左右することになる。

絶縁層が厚すぎると電流が流れなくなる。かといって、数原子層とい

¹ 薄膜ヘッド=誘導型ヘッドの一種。半導体を作るのと似たプロセスで製造する。誘導型ヘッドは電磁誘導の原理を使って磁気ディスクに記録/再生するヘッド。再生出力がヘッドとディスクの相対速度に比例する。

注1) 再生出力をn倍にしたときトラック密度もn倍になるのは、媒体からの雑音を考慮しない場合である。実際には、再生出力をn倍にしたときトラック密度が何倍になるかは、媒体からの雑音の大きさによってn倍~1倍まで変化する。一方、面記録密度は、トラック密度と線記録密度のかけ算で求められる。このためトラック密度をn倍にすれば面記録密度もn倍になる。

¹ GMRヘッド=GMRヘッドは、信号の再生に使うヘッドである。データの書き込みには誘導型のヘッドを利用する。再生の原理はMRヘッドと基本的に同じ。磁界の変化に応じて電気抵抗が変わる素子を利用して、磁気的に記録された情報を再生する。このときに使う素子の感度(磁界の変化に対する抵抗の変化率)が、MRヘッドで使っている素子に比べて数倍高い。

った薄い絶縁膜を形成するのは容易でない。絶縁層にピンホールができれば短絡が起き、磁気抵抗効果が失われる。厚さ1nm前後の均一で緻密な絶縁層を形成しなければならない。これが難しい。

「同じ構造の膜を作ったつもりでも特性が全然違う。1度高い抵抗変化率を示す膜が作れても、再び同じ膜が作れるとは限らない」(東北大学の宮崎教授)。TMR膜のネックはこの点だった。

GMR膜よりもはるかに高い抵抗

変化率を示すTMR膜は存在する。それはわかった。しかし、これを安定に作ることができなければ、ヘッドに応用し、歩留まりよく量産することなどできない。

耐熱温度は300℃以上

光明は見えている、と富士通は主張する。「いまだに大学の研究機関などでは、試料を作るのに大変な苦勞をしていると聞く。しかし、やり方はあるだろう。実際にわれわれは、抵抗変化率が20%を超える試料を

歩留まりよく作ることができるようになってきた。できるようになれば、意外に簡単なことだ」(富士通 先端テクノロジー研究部 担当部長の小林和雄氏)²⁾。

同社が作製したTMR膜は、Ni-Fe(17.1nm)/Co(3.3nm)/Al₂O₃(1.3nm)/Co(3.3nm)/Ni-Fe(17.1nm)/Fe-Mn(45.0nm)の構造をとる³⁾。Al₂O₃層をCu層に代えれば、そのままスピナル構造のGMR膜になる材料構成である。Al₂O₃絶縁層に隣接するCo層は、抵抗変化率を向上させる目的で設けた⁴⁾。Co/Ni-Fe強磁性体層の磁化方向を固定するための反強磁性層にはFe-Mnを使った。Al₂O₃絶縁層は、Alを常温酸化することで形成した。まずAl膜を形成し、これを室温大気中に数十時間～数百時間放置する。

こういった方法で作製したTMR膜は、室温で60e程度の外部磁界を加えることで最大24%程度の抵抗変化を示した(図5)。さらにこの膜は、300℃で熱処理しても抵抗変化率が低下しなかった(図6)。

再生素子をHDD用ヘッドに応用する場合、問題になるのが素子の耐熱温度である。現在量産しているMRヘッドは、250℃といった高温で加熱する工程を使って製造している。この製造工程をそのまま使って

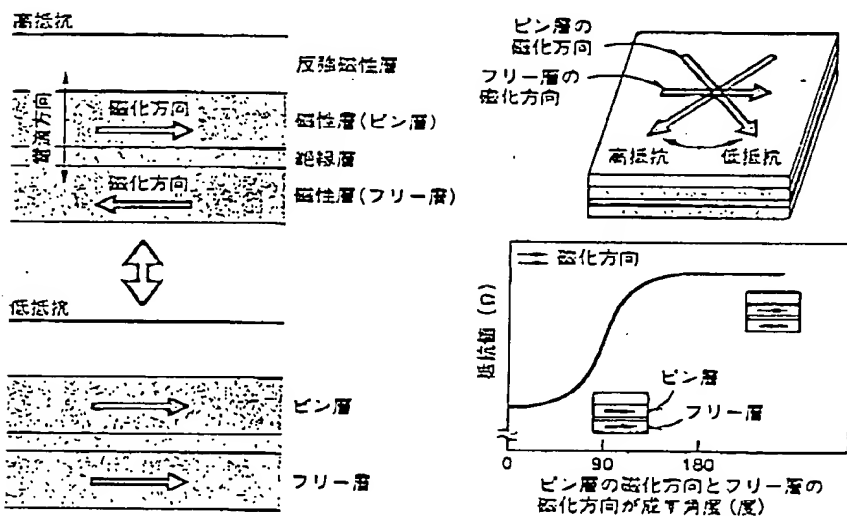


図4 反強磁性層を付加したTMR膜の磁化方向による抵抗変化 磁化方向をある方向に固定したピン層と外部磁界の影響で磁化方向が変わるフリー層の両磁化方向が同一のときに抵抗が最小となる。一方、両層の磁化方向が180度逆になるときは抵抗が最大になる。こういった抵抗変化は、磁化方向の違いによって電子が絶縁層をトンネルする割合が変わることによって起こる。

¹ 磁気抵抗効果 = 外部磁界の影響で電気抵抗が変化する効果。MR効果ともいう。巨大磁気抵抗効果 (GMR効果) やトンネル接合の磁気抵抗効果 (TMR効果) も広い意味では磁気抵抗効果 (MR効果) の一種である。

注2) 米IBM Corp.は、Fe-Mn/Ni-Fe/Al₂O₃/Co構造のTMR膜を使って抵抗変化率22%を達成した。一方の富士通は、Ni-Fe/Co/Al₂O₃/Co/Ni-Fe/Fe-Mn構造の膜を使って24%の抵抗変化率を得ている。

³ 反強磁性層 = 反強磁性体からなる厚膜層。磁化した磁性体Aに別の磁性体Bを近づけると、磁性体Bもまた磁化される。磁性体Aの磁化方向と同じ方向に磁性体Bが磁化される場合は正の交換相互作用、逆の方向となる場合は負の交換相互作用と呼ぶ。負の交換相互作用を示す磁性体Aが反強磁性体である。反強磁性体Aに近づけた磁性体Bは、反強磁性体Aの磁化方向と逆の方向に磁化される。

ヘッドを製造するためには、最低でも250℃の耐熱温度が必要になる^{注3)}。

ヘッド化の段階へ

「GMRヘッドの開発では、耐熱温度の確保が最後まで課題として残った。TMR膜の場合は、耐熱温度で苦しむことはなさそうだ。われわれが感じているように作製が意外に容易なら、TMR膜はヘッド用としてかなり良い材料なのかもしれない」(富士通の小林氏)。

同社は今後、TMR膜を使ったHDD用ヘッドの試作に取り組む予定。早ければ1998年にもヘッドとしての評価が始まるだろう。このとき問題になりそうなのは膜の抵抗値が素子の微細化に従って大きくなることである。GMR膜は、どのような大きさの素子に加工しても、タテヨコ比が同一なら抵抗値は変わらない。一方のTMR膜は、素子寸法を小さくすればするほど膜の抵抗値が大きくなる。素子の抵抗値が大きくなれば、素子に電流を流す際に発生する雑音も大きくなる。

ただし、この問題がいかほどの障害になるかはまだ未知数。もしも、このハードルもたやすく通過できたとすれば、TMRヘッドが登場する日は意外に近いかもしれない。

(仲森 智博)

図5 富士通が作製したTMR膜の抵抗変化特性。抵抗変化率は24%。Ni-Fe (17.1nm)/Co(3.3nm)/Al₂O₃ (1.3nm)/Co(3.3nm)/Ni-Fe(17.1nm)/Fe-Mn (45.0nm) 構造のTMR膜を使った。

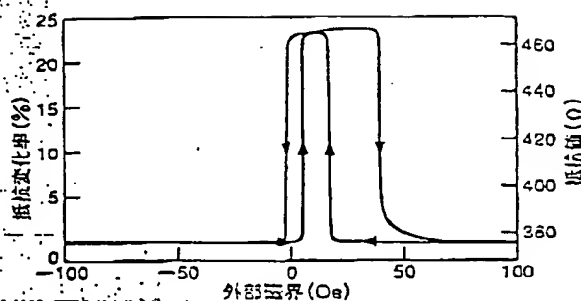
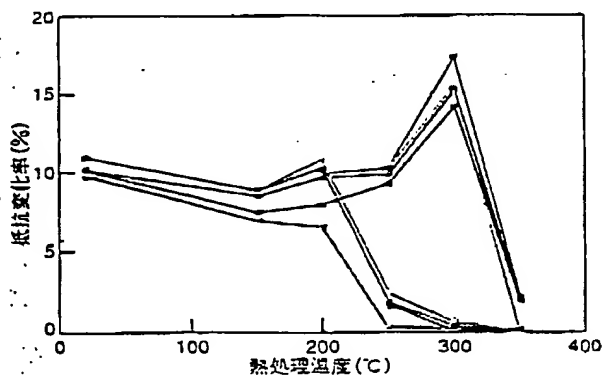


図6 TMR膜の耐熱特性。同じNi-Fe(17.1nm)/Co(3.3nm)/Al₂O₃ (1.5nm)/Co(3.3nm)/Ni-Fe(17.1nm)/Fe-Mn(45.0nm) 構造のTMR膜を複数個使って耐熱性を調べた結果。試料のなかには、200℃以上の熱処理で抵抗変化率が極端に低下するものもあるが、ほとんどの試料は300℃の熱処理に耐えるという。



参考文献

- 1) 仲森、高橋、「記録密度の限界迫るハード・ディスク装置」、『日経エレクトロニクス』、1996年7月1日号、no.665, pp.91-111.
- 2) 「HDTV対応DVDや携帯型テレビ電話に注目集まる」、同上、1997年3月24日号、no.685, pp.14-16.
- 3) 仲森、坂本、「小型ハード・ディスク装置、80Gバイトに手がとどく」、同上、1996年9月23日号、no.671, pp.83-117.
- 4) 宮崎照宣、「スピントネル磁気抵抗

効果」、『日本応用磁気学会誌』、vol.20, no.5, pp.896-904, 1996年5月。

- 5) Miyazaki, T. and Tezuka, N., "Giant Magnetic Tunneling Effect in Fe/Al₂O₃/Fe Junction," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no.139, pp. L231-L234, 1995.
- 6) Sato, M and Kobayashi, K., "Spin-Valve-Like Properties and Annealing Effect in Ferromagnetic Tunnel Junctions," *1997 The IEEE International Magnetism Conference (Inermag '97)*, 講演番号BQ-18, Apr.1997.

注3) 富士通は、Alを常温酸化することでAl₂O₃絶縁層を形成している。Al膜を形成し、これを室温大気中に数時間～数百時間放置する方法である。富士通以外の多くの研究機関で同様の方法を使っているという。ただしこの方法を使うと、Al₂O₃絶縁層に欠陥ができやすい。Al膜を放置している間にAl膜表面にゴミなどが付着するためである。このことが、大学の研究機関などで安定して試料が作製できない理由ではないかと、富士通の小林氏は想像している。つまり、LSIの量産ラ

インに匹敵するクリーン・ルームで膜を作製すれば欠陥の少ないAl₂O₃絶縁層が作製でき、安定な特性が得られる。しかし、クリーン度が低い実験室で膜を作製すると多くの欠陥が発生して特性が一定にならない、というわけである。

注4) TMR膜の抵抗変化率は、使う磁性層の材料によって変わる。一般的には、分極磁石(磁石としたときの磁力の強さ)が大きい金属や合金を使えば、抵抗変化率も大きくなる。CoはNi-Feよりも分極率が高いため、この層を絶縁層の両側に挿入すれば理論上、抵抗変化率が大きくなる。

注5) 現在のMRヘッドは、MR膜を形成後にコイルを形成し、有機絶縁膜を塗布し、250℃で熱処理する方法で作製している。

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.